

## 素材を組み合わせることで触感を指定する 振動触覚テクスチャの合成技術

松浦洋一郎<sup>\*1</sup>, 岡本正吾<sup>\*1</sup>, 浅野修平<sup>\*1</sup>, 永野光<sup>\*1</sup>, 山田陽滋<sup>\*1</sup>

### Synthesis of Vibrotactile Textures by Specifying the Combination of Materials

Yoichiro MATSUURA<sup>\*1</sup>, Shogo OKAMOTO<sup>\*1</sup>, Shuhei ASANO<sup>\*1</sup>,  
Hikaru NAGANO<sup>\*1</sup>, Yoji YAMADA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

A vibrotactile texture display produces virtual textures by applying vibratory stimuli to finger pads. In this study, we developed a technique to synthesize such textures based on certain specified materials. For example, the technique allows us to alter vibrotactile textures using terms such as “wood-,” “cotton-,” or “paper-like” which are familiar to end users of displays. The altered textures feel more similar to these specified materials. We realized this technique by constructing a texture space, in which the materials are located based on the features of their vibrotactile spectra. The vibrotactile textures were then modified in this space. Our experimental results show that the technique can be used to alter a virtual wood texture to feel like cloth.

**Key Words** : Haptics, Vibrotactile Display, Texture Synthesizing, Factor Analysis

## 1. 緒 言

触覚刺激を仮想的にヒトに呈示するデバイスとして触覚ディスプレイがある。われわれは、指腹に振動刺激を加えることで、布や木材などの仮想素材表面の触感を呈示する振動触覚テクスチャ・ディスプレイを取り扱う。このようなテクスチャ・ディスプレイは、各種情報端末にて体感メディアとして活用されることが期待されている。本研究の目的は、特定の素材を規範とした触覚テクスチャの合成を可能にする手段を開発することである。この手法は、例えば、「木綿」や「絹」といった馴染みのある素材の名称を用いて、仮想素材の触感を合成・加工することを可能とする。その明らかな利点は、触覚センサや素材の物理量を計測する装置、機械受容器に関する知識などを必要とせず、誰にでも触感を設計することが可能となることである。

例えば、博物館の学芸員が触覚ディスプレイを用いて、展示物の触感の体験を来館者らに提供する場合について考える。学芸員は、馴染みのある素材の名称を用いて、仮想テクスチャを設計することができる。恐竜の皮膚の化石の触感を合成したければ、われわれの手法を用いて、石と皮革の仮想素材を合成することで、

皮膚の化石の触感を生成することができる。また、こうして合成された触感が所望のそれと異なる場合には、さらに素材の名称を用いて、触感を調整することも可能である。このように、われわれの手法では、特定の素材の名称を用いて触感を合成したり、それを特定の素材に似せて加工することが可能である。また、近い将来、ウェブでの触覚コンテンツの配信が可能となる時、コンテンツの制作者は、あらかじめ用意された素材の名称を選択し、組合せることで、触覚ディスプレイに再生されるテクスチャを合成することができる。

### 関連研究との相違

エンドユーザが仮想テクスチャを加工するという観点において、われわれの手法と、これまでの触覚テクスチャ・ディスプレイの違いについて述べる。これまでの触覚テクスチャ・ディスプレイは、ユーザ自身が触感を設計する観点において必ずしも使いやすいたとは限らない。典型的な触覚テクスチャ・ディスプレイの一つとして、ピンマトリクス型がある。ユーザは素材の表面形状や圧力分布を模擬したピン配列に触れることで触感を体験する<sup>(1)(2)(3)</sup>。この手法で仮想テクスチャを設計するためには、素材表面の形状や、皮膚と接した際の圧力分布に関するデータが必要であり、エンドユーザによる触感設計には不向きである。ただし、Ikeiら

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科 (〒 464-8601 愛知県名古屋市長千種区不老町)

の手法のように、素材の写真の輝度を基にテクスチャを生成すれば、エンドユーザ向けのインタフェースの提供が可能となるかもしれない<sup>(2)</sup>。また、素材を指先でなぞった際に指腹に加わるせん断力や、素材表面と指腹の間の摩擦力を模擬する触覚テクスチャ・ディスプレイがある<sup>(4)(5)(6)(7)(8)(9)</sup>が、この手法でエンドユーザが仮想テクスチャを設計するためには、模擬するせん断力や摩擦力に関する知識や、それらの計測が必要となる。したがって、エンドユーザがあらかじめ開発者から提供された仮想テクスチャ以上に、新たなテクスチャを設計しようとする、利用可能な術は限られる。さらに、特定の機械受容器の活動量を調整することで、触感を設計する手法がある<sup>(12)(13)</sup>が、これは受容器に関する知識を要求するため、エンドユーザが触感を設計するには不向きである。

これまでの触覚テクスチャ呈示手法の中で、エンドユーザにとってテクスチャを設計するために最も使いやすい手法は、次の通りである。Caldwellらは熱および圧力、表面粗さ、柔らかさ、摩擦という、仮想素材の物理特性を選択的に調整可能なディスプレイを開発した<sup>(10)</sup>。また、Yamauchiらは粗さ感と硬軟感、摩擦感という触感の要素を合成することで、テクスチャを生成する手法を開発した<sup>(11)</sup>。これらの手法を用いれば、エンドユーザはなじみのある物理もしくは触感要素を用いて、仮想テクスチャを生成・加工することができる。われわれの手法の特徴は、素材の名称を組み合わせることで触感を合成することを可能とする点にあり、これらの物理的もしくは心理物理的な特徴を規範とした手法とは明確に異なる。

## 2. 触感空間に対応する物理量空間の構成

### 2.1 スペクトラムに埋もれたテクスチャ

素材表面の触感と指腹の皮膚振動や変形のスペクトラムの間には密接な関係がある。BensmaïaとHollinsは、フィン・テクスチャの触感の相違が、素材表面をなぞった際の皮膚振動のパワースペクトラムの高周波成分の違いと相関があることを示した<sup>(14)</sup>。Okamotoらは、高周波帯域のみでなく、数十ヘルツの低周波帯域も含む振動触覚テクスチャ刺激に対しても、スペクトラムを基にした指標によりテクスチャの知覚的差異を表現できることを示した<sup>(15)</sup>。また、Wiertelwskiらは、素材表面をなぞった際の指腹と素材表面の間の摩擦力のスペクトラムを維持することで、指と触感ディスプレイの間の相対変位がない状態においてもテクスチャが仮想的に呈示されるとした<sup>(9)</sup>。そこでわれわれは、素材の知覚的性質に関する特徴量は皮膚振動のスペクトラムから抽出できるとの仮説に基づき、研究を進める。

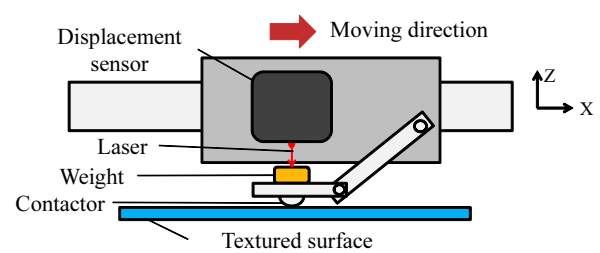


Fig. 1 : Schematic diagram of the apparatus used for measuring the surface profile of a texture with sustained pressure

### 2.2 負荷状態での接触子の振動計測

素材の表面を指腹でなぞると、素材の表面形状に依存して接触面の皮膚が変形する。この接触面の皮膚変形を直接計測することは困難なため、代替手段として、指腹でなぞる際と同等の負荷が掛かった接触子（半球状剛体）で素材を擦り、その振動を計測した（図1）。接触子は半球状の剛体であり、120 gが素材に加わるように、錘を設置した。リンク機構の共振周波数は、われわれが関心のある帯域の外にある。素材の長さは100 mmとし、接触子の移動速度は20 mm/sとした。変位センサはレーザ変位計（CD5-30, OPTEX FA Co., Kyoto, Japan）であり、その分解能は、接触子の微小な振動を計測するために0.02 μmとした。変位計のサンプリング周波数は、ユーザが指で仮想素材をなぞった時にディスプレイが500 Hzまでの振動触覚刺激を呈示可能となるように決定した。計測した素材は、ポプラ木材、クルミ木材、目の粗い布(A)・(B)・(C)、目の細かい布(D)、トリヨン（柔らかくマクロな凹凸形状をしたレザー）、タンロー（硬く平坦な形状をしたレザー）であった（図2）。各素材について、3回ずつ計測した。

### 2.3 物理量ベクトル群の構成

先に述べたように、素材表面に触れた際の触感は、素材ごとに異なる振動触覚スペクトラムに表現されると考える。このスペクトラムから、物理量ベクトルを次のように算出した。2.2節で得られた素材ごとの振動波形から振幅スペクトラムを計算した。各素材に対し3個のスペクトラムが得られるが、それらの平均を用いた。そして、500 Hzまでの周波数を、10の周波数帯に分け、それぞれの周波数帯ごとに振幅スペクトラムの総和を求めた。周波数を $f$ 、振幅スペクトラムを $a(f)$ として、素材Aの $i$ 番目の周波数帯のスペクトラムの総和を

$$S_{Ai} = \int_{f_{i-1}}^{f_i} a(f) df \quad (i = 1, \dots, 10) \quad (1)$$

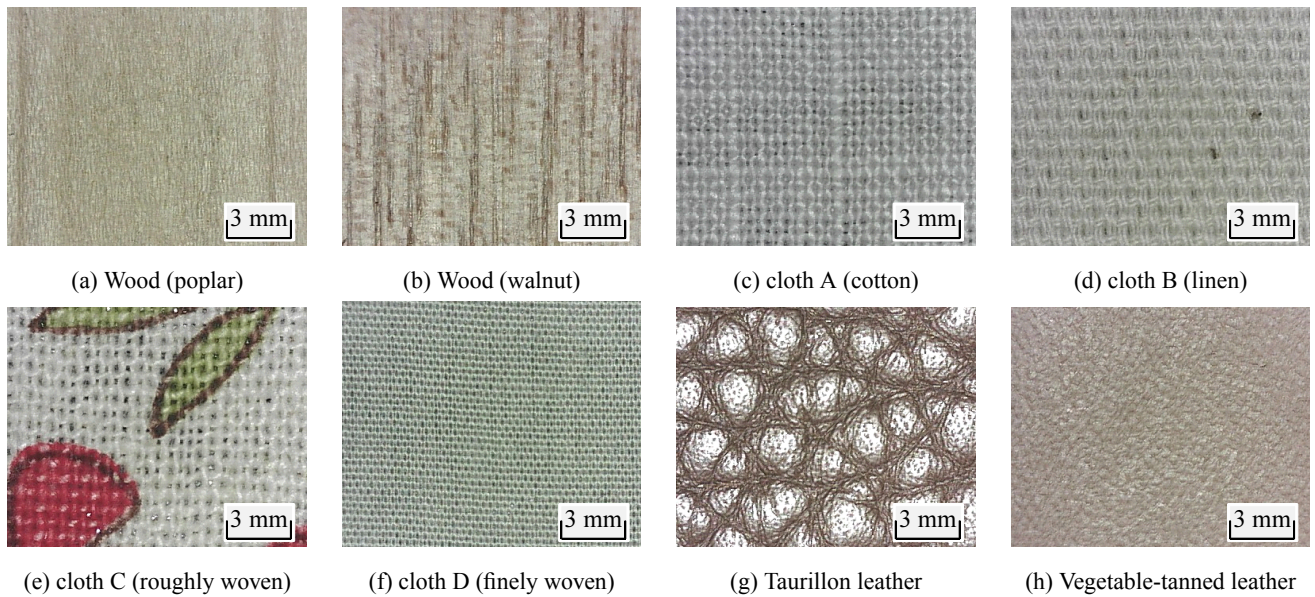


Fig. 2 Measured materials

と表す. これらを素材の物理量とする. ただし, 積分区間は

$$\{f_0, f_1, \dots, f_{10}\} = \{0, 5, 10, 30, 50, 70, 100, 150, 250, 350, 500\} \quad (2)$$

とした. 低周波帯域ではマイスナー小体とメルケル小体の感度が高く, さらにそれらの活動帯域幅が相対的に狭いことから, 低周波帯域における積分区間を狭くした. 高周波帯域ではパチニ小体の感度が非常に高く支配的なため, 100 Hz 以上の高周波帯域では積分区間を広くした. 素材の物理量ベクトルは

$$s_A = (s_{A1}, s_{A2}, \dots, s_{A10})^T \quad (3)$$

と表される.

**2.4 構成された物理量空間とその基軸** 前節で得られた物理量ベクトルに因子分析を適用する. 因子分析とは, より少ない因子で多変量を表す分析手法である. 分析の結果, 3つの因子が抽出された. 各因子の意味は, その因子負荷量から推測することができる. 因子負荷量は, 因子と多変量の間にある関係の強さを示す. 第1因子の因子負荷量は, 低周波数帯域では小さく, 高周波数帯域では大きかった. 従って, 第一因子は, 高周波成分を主体とする振動触覚刺激である. 第2因子の因子負荷量は, 低周波数帯域が大きく, 高周波数帯域では小さかった. よって, 第2因子は低周波成分を主体とする振動触覚刺激を表す. 第3因子の因子負荷量は中間周波数帯 (30 から 70 Hz) で大きく, 他の周波数帯域では小さかった. したがって, この因子は中間周波数帯成分を主体とする.

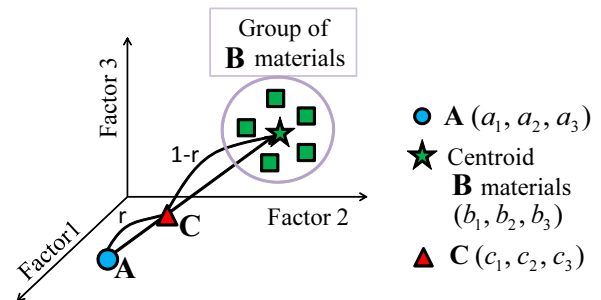


Fig. 4 : Method for making texture A perceptually close to texture B

因子分析の結果, 構成された物理量空間を図3に示す. 第1-2次元平面 (図. 3(a)) では, 木材が下方に分布し, 目の粗い布 (布 (A), 布 (B), 布 (C)) と皮革が上方に分布している. 第2-3次元の平面 (図. 3(b)) では, 木材が左方に分布し, 粗い布 (布 (A), 布 (B), 布 (C)) と皮革が右方に分布している. 目の細かい布 (布 (D)) は下方に分布している. 触感が類似した素材が空間上で近在していることから, 振動触覚スペクトラムから抽出された物理量は, 素材の触感の特徴をよく表している.

### 3. 特定の素材を規範とした振動触覚テクスチャ加工法

素材 A の振動触覚テクスチャを加工し, 素材 B に似せるようにする手法を説明する. これを実現するために, 因子空間上で, 素材 A と素材 B 群の重心を通る直線上に, 新たな素材 C を生成する (図4). 図4の四角記号は因子空間上での素材 B 群を表しており, 星

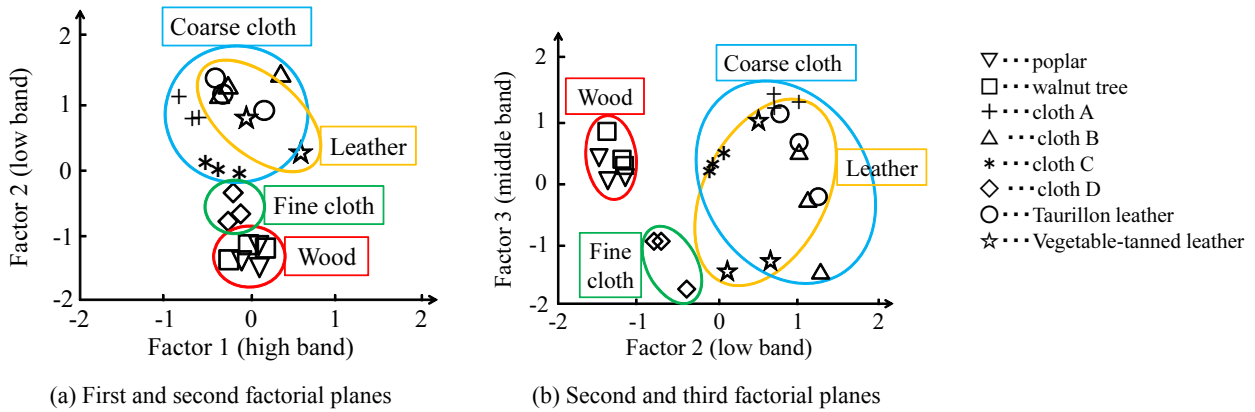


Fig. 3 Distribution of materials in factorial space

記号は素材 B 群の重心である。素材 C とは、素材 A を素材 B にいくらか似せたものことである。

素材 A の第  $i$  次元の因子得点を  $a_i$  とし、素材 A の因子空間上での座標を  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)^T$  とする。また、混合率を  $r$  とする。混合率とは、素材 A をどれだけ素材 B に近づけるかを表す。素材 C の因子空間上の位置ベクトルは

$$\mathbf{c} = r\mathbf{b} + (1-r)\mathbf{a} \quad (4)$$

となる。 $\mathbf{b}$  は素材 B 群の重心の位置ベクトルである。因子分析で得られた因子負荷行列を  $\mathbf{L} = (\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3)$  ( $\mathbf{l}_i$  は因子負荷行列の第  $i$  列ベクトル) とすれば、素材 C の物理量ベクトルは

$$\mathbf{v}_C \sim (\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3) \cdot \mathbf{c} = \begin{pmatrix} s_{1C} \\ s_{2C} \\ \vdots \\ s_{10C} \end{pmatrix} \quad (5)$$

と近似される。素材 A の振幅スペクトラムは、周波数を  $f$  とすれば、

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_A &= (a_A(f), f = 1, 2, \dots, 500) \\ &= (\mathbf{a}_{A1-5}, \mathbf{a}_{A6-10}, \dots, \mathbf{a}_{A351-500}) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ただし、振幅スペクトラムをベクトルで表したときの周波数  $l$  から  $m$  までのサブベクトルを

$$\mathbf{a}_{A1-m} = (a_A(l), a_A(l+1), \dots, a_A(m)) \quad (7)$$

と定義する。このとき、素材 C の振幅スペクトラム  $\mathbf{a}_C$  は

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_C &= \left( \frac{s_{C1}}{s_{A1}} \mathbf{a}_{A1-5}, \dots, \frac{s_{C10}}{s_{A10}} \mathbf{a}_{A351-500} \right) \\ &= (a_C(1), a_C(2), \dots, a_C(500)) \end{aligned} \quad (8)$$

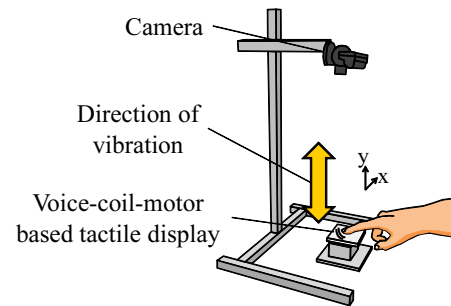


Fig. 5 : Schematic illustration of the tactile display

で決定される。この計算は、素材 A と素材 B の振幅スペクトラムの内分点を素材 C の振幅スペクトラムとすることに相当する。素材 C の位相スペクトラムが素材 A の位相スペクトラムと同じとすれば、素材 C の表面の変位は、

$$y(x) = \sum_{f=1}^N \left[ a_C(f) \cdot \cos \left( \frac{2\pi f x}{N} + \angle C_A(f) \right) \right] \quad (9)$$

となる。ただし、 $x$  は素材表面上の位置、 $C_A(f)$  は素材 A の複素スペクトラムである。これが仮想素材の表面形状であり、振動触覚刺激として触覚ディスプレイのユーザに呈示される。

#### 4. 実験装置

実験装置の全体像を図 5 に示す。この装置の振動触覚テクスチャ・ディスプレイはボイスコイルモータ (X-1740, 青山特殊鋼製, Tokyo, Japan) を用いたものである。振動方向はユーザがなぞり運動を行う方向 (図 5 の  $x$  方向) に対して垂直となる方向 (図 5 の  $y$  方向) である。500 Hz 以上の振動を呈示可能であり、マイスナー小体、メルケル小体、パチニ小体を刺激することが可能である。この装置は、カメラを用いて指の位置を計測し、その運動に応じて振動刺激を指腹に呈示する。時刻  $t$  の指先の位置を  $x(t)$  とすれば、これを

Table 1 Results of experiment 1: Average answer rates

Presented virtual material	Perceived/Identified material			
	Poplar	Cotton	Linen	Leather
	Poplar	0.77	0.18	0.02
Cotton	0.02	0.27	0.42	0.30
Linen	0.00	0.05	0.52	0.43
Leather	0.15	0.60	0.12	0.13

式 (9) に代入した  $y(x(t))$  が振動触覚刺激として指腹に呈示される。

## 5. 振動触覚テクスチャの加工実験

**5.1 実験の目的** 2種類の実験を行った。実験1の目的は、われわれの振動触覚呈示手法に適した素材を選定することである。これは、振動触覚テクスチャ・ディスプレイには、呈示可能な素材に限りがあり、それらを実験の対象から除外するためである。例えば、温冷や柔らかさが特徴である素材は、振動触覚テクスチャ・ディスプレイには不向きである。実験2の目的は、特定の素材を規範に触覚テクスチャの加工が可能であるのかを検証することである。実験2では、実験1の結果を踏まえて選定された素材を用いた。

### 5.2 実験1: 振動触覚ディスプレイに適した素材の選定

**5.2.1 刺激** 使用した仮想素材は、振動刺激によって生成されたポプラ（ポプラ木材）、木綿（目の粗い布 (A)）、麻（目の粗い布 (B)）、トリヨンレザーであった。これらの仮想素材を選択した理由は、これらの実素材を高い確率で判別できるためである。参加者らは、これら4種類の仮想素材が指腹に呈示されることを事前に知らされた。ただし、それらの仮想素材と実素材の対応については知らされていなかった。4種の仮想素材はランダムに呈示され、1種あたり合計で20回呈示された。よって、参加者一人当たりの試行数は80回である。

**5.2.2 手順** 参加者らは呈示された仮想素材に次々と触れ、その素材を同定した。実験中、参加者らは自由に実素材に触れることができた。参加者はボイスコイルモータが生成する音を遮断するためにヘッドフォンを装着し、ピンクノイズを聴いた。実験の参加者は、著者らを除く、著者らの研究室のボランティアの3名であった。

**5.2.3 実験1の結果** 実験1での参加者らの平均回答率を表1に示す。ポプラと麻の回答率がチャンスレベル (0.25) より高かったため、これらは振動触覚刺激によって呈示可能である。対照的に、木綿およびトリヨンレザーの正答率はチャンスレベルと同等かそれ以下であった。これら2種の素材は頻繁に混同された。トリヨンレザーは表面が柔らかいが、われわれの

Table 2 Result of experiment 2: Average answer ratios

Presented virtual material	Perceived/Identified material		
	Poplar	Cotton	Linen
	Poplar	0.95	0.05
Cotton	0.03	0.52	0.45
Linen	0	0.05	0.95
X	0.28	0.70	0.02

触覚刺激手法は、この柔らかさを表現しないため、参加者らはトリヨンレザーを上手く同定できなかった。トリヨンレザーを除けば、参加者らは木綿とトリヨンを混同せず、木綿を同定することができることが予想される。したがって、実験2では、ポプラ、木綿、麻の3種類の素材を用いることにした。

### 5.3 実験2: 特定の素材を規範とした振動触覚テクスチャの加工技術の検証

**5.3.1 刺激** ポプラ、木綿、麻、仮想素材Xの4種類の仮想素材が参加者らに呈示された。仮想素材Xは、われわれの提案手法を用いて、ポプラの仮想素材を、混合率  $r = 0.2$  で木綿の仮想素材に近づけたものである。参加者らは、4種類の仮想素材が指腹に呈示されることを事前に知らされた。ただし、それらの仮想素材と実素材の対応については知らせなかった。刺激の呈示順序はランダムとし、1種類の仮想素材につき20回ずつ呈示した。よって、参加者一人当たりの試行数は80回である。

**5.3.2 手順** 参加者らは呈示された仮想素材に次々と触れ、その素材をポプラ、木綿、麻の中から同定した。実験中、参加者らは自由に実素材に触れることができた。実験の参加者は、実験1と同様に3名であった。

実験2での参加者らの平均回答率を table. 2 に示す。ポプラの正答率は95%、木綿の正答率は52%であった。したがって、ポプラと木綿の触覚テクスチャは高確率で同定された。仮想テクスチャXをポプラであると回答した確率は28%、木綿であると回答した確率は70%であった。仮想テクスチャXが、本当にポプラから木綿らしくなったのかを確認する。 $P(\text{Cotton} | \text{Pop.})$  は、ポプラを模擬した触覚テクスチャを木綿であると答えた確率とし、 $P(\text{Cotton} | \text{X})$  は、仮想テクスチャXを木綿であると答えた確率とする。仮想テクスチャXがポプラから木綿らしくなったのであれば、 $P(\text{Cotton} | \text{Pop.}) < P(\text{Cotton} | \text{X})$ 、かつ、 $P(\text{Pop.} | \text{Pop.}) > P(\text{Pop.} | \text{X})$  となるはずである。Fig. 6 は  $t$  検定の結果を示したものである。Fig. 6 を見ると、 $P(\text{Cotton} | \text{Pop.}) < P(\text{Cotton} | \text{X})$  となっている。 $t$  検定により、これらの確率の間には有意差がみられた ( $t_0(\text{dof}) = 7.12, p < 0.05, \text{two-tailed}$ )。Fig. 6 を見ると、 $P(\text{Pop.} | \text{Pop.}) > P(\text{Pop.} | \text{X})$  となっている。 $t$

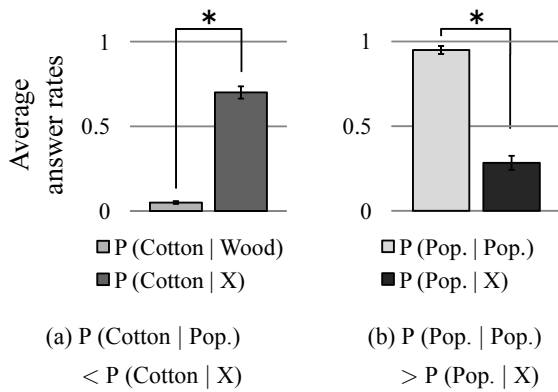


Fig. 6 Averages of answer ratios:  $t$ -test exhibited a significant difference between each two probabilities, so we succeeded to alter vibrotactile textures based on specified material

検定により、これらの確率の間には有意差がみられた ( $t_0(dof) = 2.79, p < 0.05$ , two-tailed). 以上の結果は、ポプラを模擬した触覚テクスチャが木綿らしくなったことを表している。したがって、われわれの提案手法を用いることで、特定の素材を規範として触覚テクスチャを加工することが可能である。

## 6. 結 論

われわれは、特定の素材を規範とした触覚テクスチャの加工技術を開発した。この技術を用いることで、エンドユーザは触覚センサなどの計測装置や受容器の知識を必要とせず、なじみのある素材の触感を基に触感を設計することができる。この手法は、振動触覚信号のスペクトラムの特徴量を基に構成された物理量空間を使用した。この物理量空間は、素材の触感の類似性を表わすものでもある。この空間上で仮想素材を操作することにより、触感を操作しつつ、それに対応する振動触覚刺激を決定することができる。振動触覚テクスチャ・ディスプレイを用いて、素材同定実験にて提案手法の有効性を検証した。木材の触感を木綿に似せるように加工したところ、木材と木綿の間のような触感を有する仮想素材が生成された。しかし、回答率が二種の素材の間になったことが、必ずしも中間の触感になったことを示しているとは限らないため、今後は様々な種類の素材にこの技術を適用し、その有効性を多面的に評価していくと共に、制限を明らかにしていく。

## 参 考 文 献

(1) R. D. Howe, W. J. Peine, D. A. Kontarinis, J. S. Son, "Remote Palpation Technology," *IEEE Engineering in*

*Medicine and Biology*, Vol. May/June, (1995), pp. 318–323.

- (2) Y. Ikei, K. Wakamatsu, S. Fukuda, "Vibratory Tactile Display of Image-based Textures," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. November/December, (1997), pp. 53–61.
- (3) K. Kyung, J. Lee, "Ubi-Pen: A Haptic Interface with Texture and Vibrotactile Display," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. January/February, (2009), pp. 56–64.
- (4) A. Yamamoto, S. Nagasawa, T. Higuchi, "Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresentation System," *IEEE Transaction Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, (2006), pp. 168–177.
- (5) T. Nara, M. Takasaki, S. Tachi, T. Higuchi, "An Application of SAW to A Tactile Display in Virtual Reality," *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, (2000), pp. 1–4.
- (6) T. Watanabe, S. Fukui, "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995), pp. 1134–1139.
- (7) L. Winfield, J. Glassmire, E. Colgate, M. Peshkin, "T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction," *Proceedings of World Haptic Conference*, (2007), pp. 421–426.
- (8) O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, C. Harrison, "TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces," *Proceedings of User Interface Software and Technology*, (2010), pp. 283–292.
- (9) M. Wiertelowski, J. Losada, and V. Hayward, "The Spatial Spectrum of Tangential Skin Displacement Can Encode Tactile Texture," *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 27, No. 3(2011), pp. 461–472.
- (10) D. G. Caldwell, C. Gosney, "Enhanced Tactile Feedback (Tele-Taction) using a Multi-Functional Sensory System," *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1993), pp. 955–960.
- (11) T. Yamauchi, S. Okamoto, M. Konyo, Y. Hidaka, T. Maeno, S. Tadokoro, "Real-Time Remote Transmission of Multiple Tactile Properties through Master Slave Robot System," *Proceedings of IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation*, (2010), pp. 1753–1760.
- (12) M. Konyo, S. Tadokoro, T. Takamori, K. Oguro, "Artificial Tactile Feel Display Using Soft Gel Actuators," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2000), pp. 3416–3421.
- (13) H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda and S. Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," *Proceedings 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, (1999), pp. 107–114.
- (14) S. Bensmaïa and M. Hollins, "Pacian Representations of Fine Surface Texture," *Perception and Psychophysics*, Vol. 67, No. 5(2005), pp. 842–854.
- (15) S. Okamoto, Y. Yamada, "An Objective Index That Substitute Quality of Vibrotactile Material-like Texture," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, (2011), pp. 3060–3067.